荒漠草原灰钙土与风沙土水分时空特征

杨霜奇[1,2,3]， 宋乃平[1,2,3]， 王 兴[1,2,3]， 陈晓莹[4]， 常道琴[1,2,3]

（1. 宁夏大学生态环境学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培训基地，宁夏 银川 750021；3. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021；4. 宁夏大学农学院，宁夏 银川 750021）

摘 要：受人为和自然因素干扰，宁夏荒漠草原原生灰钙土经过长期沙化，面积逐渐缩小并形成岛状斑块分布在广大风沙土中。为揭示灰钙土沙化后土壤水分时空特征，于2017—2019年生长季内（5—10月）在宁夏盐池县皖记沟村选取大（200~300 m²）、中（约100 m²）、小（约50 m²）面积各3个斑块，分别开展斑块内部灰钙土与其外围风沙土的含水量对比研究。结果表明：（1）从时间上来看，2017年均匀降雨格局使得全年土壤平均含水量最高；2018年全年降雨量略高于2017年，但集中于春季，夏秋季几乎无降雨事件，导致全年土壤含水量均较低；2019年夏季降雨年型使得土壤平均含水量在夏季最高。（2）0~100 cm剖面内灰钙土含水量随土层深度的增加表现出先增加后减少，10~40 cm土层较高；而风沙土含水量随土层深度的增加而增大，0~20 cm土层土壤含水量远低于20~100 cm。0~20 cm土层灰钙土含水量大于风沙土，20~100 cm土层灰钙土含水量显著小于（$P<0.05$）风沙土（2018年中小斑块除外）。除大斑块外围风沙土含水量显著大于（$P<0.05$）中小斑块外，不同大小斑块之间灰钙土含水量无显著差异（$P>0.05$）。（3）灰钙土0~100 cm土层储水量整体低于风沙土，且同一时间段内变化幅度小于风沙土。当降雨量<16 mm时，两种土壤类型的水分均处于消耗状态；当降雨量在16~25 mm时，灰钙土储水量多于风沙土；但降雨量>25 mm时，风沙土储水量则多于灰钙土。荒漠草原的土壤含水量由降雨量及其分配格局主导，其次是土壤类型。灰钙土和风沙土的含水量不仅在剖面上分布具有明显差异，而且对降雨的响应也有明显的不同。

关键词：荒漠草原；土壤水分；土壤类型；降雨变化；土壤储水量

全球气候变暖导致我国北方干旱半干旱区水资源愈加匮乏，土地荒漠化加剧[1]。为阻止荒漠化进程以及构建良好的生态环境，国内学者在荒漠地区进行了一系列研究，主要集中在植物群落[2-4]、土壤水分变化[5-6]、人工植被建植[7-9]等方面。其中，土壤水分是土壤-植物-大气连续体之间相互联系的关键因子，极大程度上影响着荒漠地区的植物生长发育和物种丰富度，对植被恢复起到了决定性作用[10-12]。土壤水分变化受降水、土壤物理特性、植被覆盖状况等因素影响[13-17]。在半干旱的荒漠草原地区，降水是荒漠草原土壤水分补给的主要来源[18]，可通过影响该地区土壤水分分布来间接实现对生态系统的结构和功能的调控[19]。此外，由于不同土壤类型的物理性质差异，土壤水分分布情况有所不同[20]。如郑飞龙等[21]对压砂条件下灰钙土水分垂直入渗特征研究发现，压砂厚度、砂石粒径等会影响土壤水分的分布；江璇等[22]对四川西部某林区不同植被下的土壤水分研究发现，孔隙度越小的土壤，水分时间稳定性更高；陈娟等[23]揭示了土壤类型对土壤水分的动态变化具有决定性作用，在同一土壤剖面上，风沙土的土壤含水量大于灰钙土；苏莹等[24]研究了风化基岩残积土、灰钙土和风沙土三种不同土壤的土壤水分时空变化特征，发现风化基岩残积土保水性以及总蓄水量最大；吴世磊等[25]发现川西北高寒沙地的沙化程度越高，土壤保水性和平均含水率越低。因此，分析不同类型土壤的水分动态变化及其与降水之间的关系对于在荒漠地区构建合理的生态格局至关重要[26]。

收稿日期：2023-02-13； **修订日期**：2023-04-22
基金项目：宁夏回族自治区重点研发项目(2019BFG02022)
作者简介：杨霜奇（1996-），女，硕士研究生，主要从事恢复生态学研究. E-mail: 594535157@qq.com
通讯作者：宋乃平. E-mail: songnp@163.com

宁夏盐池县荒漠草原由于长期受人为放牧和自然干扰的影响导致生境破碎化，原生灰钙土在风沙作用下母质片断化，形成了分散于沙地中的岛状斑块[27]。然而，随着斑块面积的减小，灰钙土沙化的程度加剧。为此，一些研究者以盐池荒漠草原斑块作为退化草地恢复的起点，探究了斑块的植被空间点格局[28]、群落物种共存机制[29]、人工建植[30]。目前，对于斑块内外部不同土质之间以及不同大小斑块之间的土壤水分变化研究较少。仅有部分学者[31]从室内试验模拟的角度，研究了灰钙土演变为风沙土后土壤水分的变化。但是土壤水分过程受气候、地形、土壤性状等多种因素的影响，复杂野外环境下斑块内部灰钙土和斑块外部风沙土土壤水分过程究竟有何差异？

基于此，本研究选择位于宁夏盐池县皖记沟村的3个样地，通过连续3 a对降雨和土壤水分的动态监测，来揭示灰钙土和风沙土水分时空分布特征，从而为该地区植被恢复提供理论基础，促进构建良好的生态群落结构，提高荒漠草原生产力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县皖记沟村的荒漠草原（37°57′~37°83′N，106°77′~107°50′E），属中温带半干旱大陆性气候，年均气温8.1 ℃，昼夜及冬夏两季温差大，干旱少雨，多年平均降雨量280 mm，蒸发量大，蒸发量是降水量的6~7倍，无霜期150 d。斑块内部土壤的主要类型为灰钙土，斑块外部主要为风沙土。研究区的主要物种有短花针茅（*Stipa breviflora*）、猪毛蒿（*Artemisia scoparia*）、苦豆子（*Sophora alopecuroides*）、糙隐子草（*Cleistogens squarrosa*）、牛枝子（*Lespedeza potaninii*）、细叶远志（*Polygala tenuifolia* Willd）等。

1.2 样地选择

在盐池县皖记沟村，以地势地貌等环境条件基本一致为原则，选择大斑块（200~300 m^2）、中斑块（约100 m^2）与小斑块（约50 m^2）3种不同大小的斑块作为试验样地，将斑块内部的灰钙土与斑块外部的风沙土进行对比监测和研究，为增强数据的代表性，每类样地各设3个重复。灰钙土的黏粒、粉粒、砂粒含量分别约占40%~41%、27%~29%、30%~32%；风沙土的黏粒、粉粒、砂粒含量分别约占8%~9%、19%~21%、71%~73%。

1.3 数据来源及方法

降雨、温度、土壤含水量的数据均来自于现场监测。斑块内部的几何中心作为灰钙土水分监测点，在斑块外部选取一个监测点作为风沙土水分监测点，确保斑块内外部监测点离斑块边缘的距离相等，每个监测点分别埋设3根100 cm长的聚脂碳酸探管，将TRIME-T3型TDR探头置于每根探管0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm土层的中间位置，重复测定3次，各土层深度的土壤体积含水率且各重复之间的差异不大于1/15，监测间隔时间约为15 d。2017年共监测24次，其中5月3—7日、6月8—14日的2次降雨之后每天监测1次；2018年从5月24日—11月2日共监测11次；2019年从4月26日—11月3日共监测13次。在皖记沟村安装Vantage Pro2自动气象站，降雨量等其他气象数据通过气象站自动获取，时间间隔为1 h。

1.4 数据处理

相邻2次降雨量时间间隔不超过24 h看作1次降雨事件，该事件内的累积降雨量即为单次降雨量SP（mm），按照0.1 mm≤SP<1 mm、1 mm≤SP＜5 mm、5 mm≤SP＜10 mm、10 mm≤SP＜25 mm、25 mm≤SP，将降雨等级依次划分为Ⅰ~Ⅴ级[32]。根据1 d内每小时测定的温度数据求平均值，得到日平均温度。采用Excel 2010对土壤含水量数据进行基本处理，根据3次重复监测结果求得平均值，并用于后续计算及作图。通过Surfer 11.0软件绘制土壤含水量等值线图，在图中用不同的颜色表示土壤含水量数值的大小，其余图则采用Origin 2021进行绘制。

采用SPSS 25.0对不同大小斑块以及不同土层深度的土壤含水量进行单因素方差分析，同时采用Excel 2010对斑块内外的土壤含水量差异进行双尾T检验分析（$P < 0.05$）。

常用变异系数C_v评估土壤水分垂直变化，计算公式如下[33]：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2)$$

式中：S为标准差；$\bar{X}$为样本（土壤水分观测值）平均

值；n 为样本总个数；X_i 为样本的第 i 个观测值。

土壤储水量指一定土壤深度的体积水分含量，可采用以下公式计算[34]：

$$SW=\sum_{i=1}^{6}\theta_i d_i \tag{3}$$

式中：SW 为0~1 m土壤储水量(mm)；θ_i 为土壤水分探头测得的各层土壤含水量；d_i 为对应的土层深度(mm)。

土壤储水变化量(ΔW)代表在某一具体时间内土壤水分的消耗或者积累情况[14]，计算公式如下：

$$\Delta W=SW_2-SW_1 \tag{4}$$

式中：SW_1 为某一具体时间前土壤储水量(mm)；SW_2 为某一具体时间后土壤储水量(mm)。如果 $\Delta W<0$ ，表明土壤水分在该时期为消耗型；如果 $\Delta W>0$ ，则为积累型；如果 $\Delta W=0$ ，则为平衡型。

2 结果与分析

2.1 2017—2019年生长季降雨特征

2017—2019年生长季(5—10月)研究区降雨量分别为266 mm、276.8 mm、237.03 mm。虽然3个年份的降雨量差别不大，但是在时间分配上差异非常大。如图1所示，2017年生长季内每月有1~2次>10 mm的降雨，而且间隔1个月左右，比较均匀，属于均匀降雨年型。2018年降雨量集中在5月，占生长季总降雨量的76.2%，属于春季降雨年型，夏秋严重干旱。2019年降雨量主要分布在6—8月，为夏季降雨年型。

由表1可知，从2017—2019年的整体情况来看，I~V级的降雨总次数为73次，降雨总量为

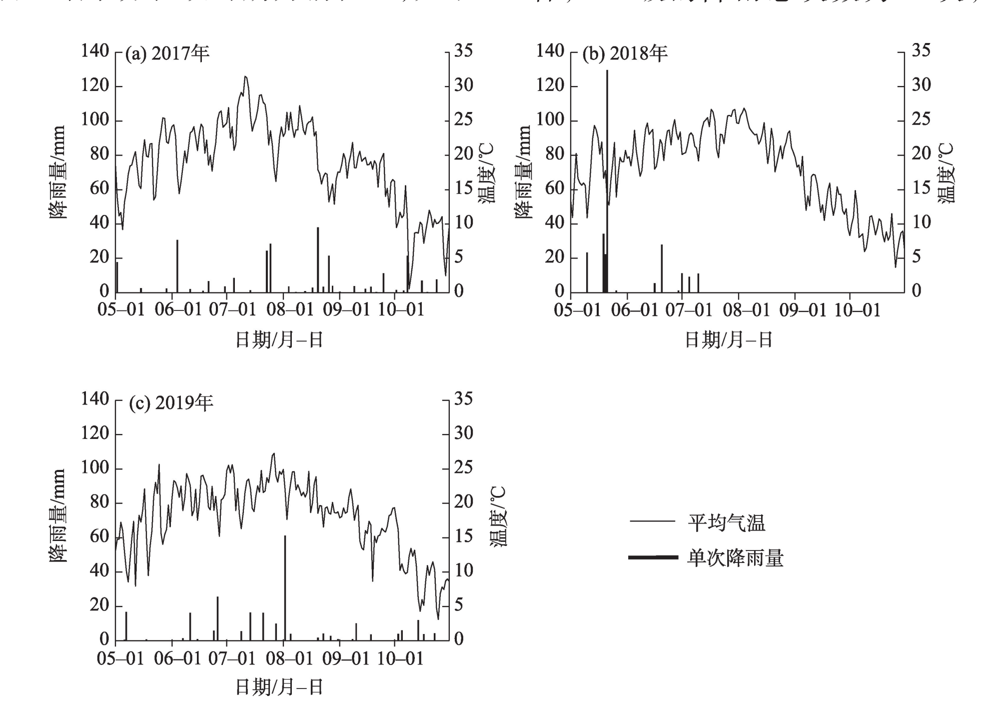


图1 2017—2019年研究区生长季内气温及单次降雨量

Fig. 1 Temperature and single precipitation during the growing season of the study area from 2017 to 2019

表1 2017—2019年各级降雨次数与降雨量

Tab. 1 Rainfall frequency and precipitation from 2017 to 2019

降雨级别	2017年			2018年			2019年		
	降雨次数/次	降雨量/mm	占总降雨量比例/%	降雨次数/次	降雨量/mm	占总降雨量比例/%	降雨次数/次	降雨量/mm	占总降雨量比例/%
Ⅰ	8	4	1.5	–	–	–	5	2.76	1.2
Ⅱ	14	38.2	14.4	2	2.4	0.9	11	32.14	13.6
Ⅲ	4	30	11.3	2	14.6	5.3	4	27.42	11.6
Ⅳ	5	96.6	36.3	4	68	24.6	6	87.87	37.1
Ⅴ	3	97.2	36.5	3	191.8	69.3	2	86.84	36.6

799.83 mm，其中，大多数降雨事件为I~II级的小降雨事件（分别为13次和27次），共占总降雨次数的54.8%，占降雨总量的9.9%；Ⅲ和Ⅳ级的中降雨事件分别占总降雨次数的13.7%和20.5%，占降雨总量的9.0%和31.6%；Ⅴ级大降雨事件发生频次很低，占总降雨次数的11.0%，占降雨总量的47.0%。从各年情况来看，2017年和2019年的降雨多为小降雨事件，分别占当年降雨次数的64.7%和57.1%，但只占当年降雨总量的15.9%和14.7%。而2018年则以III~IV级的中降雨事件为主，占当年降雨次数的54.5%，占当年降雨总量的29.8%。因此，频次多的小降雨事件对降雨总量贡献小，而频次少的大降雨事件则对总降雨量做出了主要贡献。

2.2 土壤含水量时间变化特征

对全年土壤平均含水量进行计算得到，2017年、2018年、2019年灰钙土年平均含水量分别为：7.09~7.51 mm、5.68~6.26 mm、6.65~7.06 mm，各年风沙土平均含水量分别为：8.79~12.19 mm、6.01~15.04 mm、7.87~15.04 mm。

从图2可以看出，灰钙土与风沙土含水量在时间维度上的波动表现出一致性。2017年2种土壤的含水量经历了5次较大的波动，具体表现为：从5月上旬到5月下旬降低，从5月下旬到6月中旬增加，从6月中旬到7月中旬降低，从7月中旬到8月上旬增加，从8月上旬到8月中旬降低，从8月中旬到9月上旬增加，从9月上旬到9月下旬降低，从9月下旬到10月中旬增加；2018年土壤含水量波动很小，在5月降低后一直处于相对平稳且较低的状态；2019年土壤含水量经历了4次较大的波动，具体表现为：从5月上旬到5月中旬增加，从5月中旬到6月中旬降低，从6月中旬到7月上旬增加，从7月上旬到7月下旬降低，从7月下旬到8月中旬增加，从8月中旬到9月上旬降低，从9月上旬到9月中旬增加，从9月中旬到10月下旬降低。灰钙土土壤含水

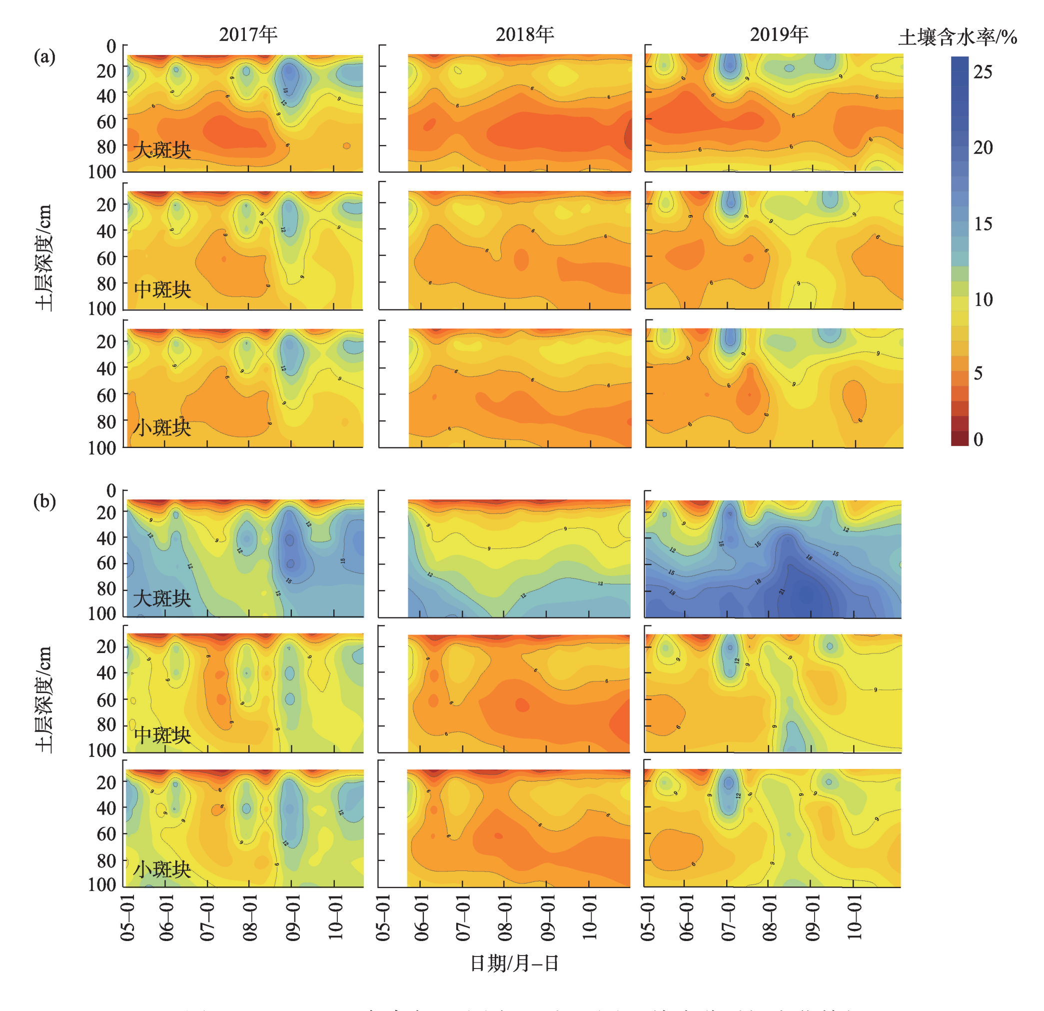


图2 2017—2019年灰钙土(a)与风沙土(b)土壤水分时间变化特征

Fig. 2 Temporal variation of soil moisture of sierozem (a) and aeolian soil (b) from 2017 to 2019

量波动的土层主要分布在0~40 cm,风沙土0~100 cm土层土壤含水量波动都比较大。

对同一年内各月份间的土壤平均含水量进行比较,发现2017年10月土壤平均含水量最高,大、中、小斑块内部灰钙土含水量分别为8.00%、8.40%、8.40%,斑块外部风沙土分别为13.19%、9.73%、10.38%,7月土壤平均含水量最低,大、中、小斑块内部土壤含水量分别为5.69%、6.30%、6.20%,外部分别为9.96%、6.77%、7.48%;2018年5月土壤平均含水量最高,大、中、小斑块内部土壤含水量分别为6.57%、7.49%、7.17%,外部分别为13.13%、7.60%、8.00%;2019年8月土壤平均含水量最高,大、中、小斑块内部土壤含水量分别为8.01%、8.99%、8.80%,外部分别为18.26%、9.99%、9.86%,5月土壤平均含水量最低,大、中、小斑块内部土壤含水量分别为5.74%、5.90%、6.08%,外部分别为14.10%、6.53%、6.62%。

2.3 土壤含水量空间分布特征

由表2可知,从不同土层分析,灰钙土含水量随土层深度的增加表现出先增加后减少,土壤含水量分布较高的土层深度是10~40 cm;0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm这3个土层的土壤含水量具有显著性差异($P < 0.05$),而40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm这3个土层的土壤含水量无显著性差异($P > 0.05$),且土壤水分显著低于10 ~ 40 cm土层($P < 0.05$)。表明0~40 cm土层土壤含水量变化大,40~100 cm土层的土壤含水量少且稳定。风沙土含水量随土层深度的增加而增大,土壤含水量分布较高的土层是20~100 cm。0~10 cm、10~20 cm这2个土层的土壤含水量具有显著性差异($P < 0.05$),而其他土层差异不明显。将斑块内外部的2种土壤进行对比分析发现,外部风沙土在0~20 cm土层土壤含水量低于内部灰钙土,尤其是0~10 cm的土壤含水量显著低于灰钙土($P < 0.05$)。外部风沙土在20~100 cm土层土壤含水量显著高于灰钙土($P < 0.05$),但2018年20~100 cm土层中小斑块的内外部不存在显著性差异($P > 0.05$)。由表3可知,对于内部灰钙土而言,不同大小斑块之间的全剖面土壤平均含水量无显著性差异($P > 0.05$);而外部风沙土的全剖面土壤平均含水量表现出大斑块显著大于中小斑块($P < 0.05$),中小斑块之间并无显著性差异($P > 0.05$)。

表2 不同斑块内部灰钙土与外部风沙土土壤剖面(0~100 cm)含水量(平均值±标准差)

Tab. 2 Water content of sierozem inside and aeolian soil outside in soil profiles for different patches(mean ± SD)

年份	土层深度/cm	大斑块		中斑块		小斑块	
		内部灰钙土	外部风沙土	内部灰钙土	外部风沙土	内部灰钙土	外部风沙土
2017年	0~10	4.67±1.39Bd	3.59±1.34Ac	4.45±1.48Ac	3.75±1.34Bb	4.70±1.53Ad	3.80±1.49Bb
	10~20	11.21±1.47Aa	10.50±1.71Ab	9.92±1.26Aa	9.04±1.56Ba	10.16±1.02Aa	9.93±1.68Aa
	20~40	9.31±1.25Ab	12.90±1.49Aa	8.86±0.76Aa	9.40±1.28Aa	8.86±1.04Bb	10.69±1.31Aa
	40~60	6.13±1.55Bcd	13.88±1.71Aa	7.11±1.20Bb	8.99±1.10Aa	7.10±1.21Bc	9.79±1.21Aa
	60~80	5.23±1.03Bd	12.91±1.23Aa	7.20±1.07Bb	8.76±1.28Aa	6.63±0.90Bc	9.09±1.03Aa
	80~100	7.07±0.18Bc	13.00±1.25Aa	7.26±0.65Bb	9.68±1.00Aa	6.79±0.45Bc	10.37±0.94Aa
2018年	0~10	4.01±0.61Ac	2.63±1.00Ba	3.94±0.97Ad	2.93±1.00Bc	4.29±1.11Ad	2.80±0.88Bc
	10~20	8.46±1.55Aa	7.98±2.05Ac	8.12±1.63Aa	7.00±1.66Ba	8.39±1.47Aa	7.50±2.33Aa
	20~40	6.70±1.16Bb	9.58±1.66Abc	6.92±1.12Ab	6.90±1.68Aa	7.05±1.18Ab	7.12±1.89Aa
	40~60	3.98±0.49Bc	10.95±1.34Ab	5.40±0.51Ac	5.11±0.81Ab	5.45±0.37Acd	5.36±0.78Ab
	60~80	4.06±0.72Bc	12.76±1.48Aa	5.56±0.67Ac	4.94±1.07Bb	4.99±0.45Ad	5.11±0.78Ab
	80~100	6.33±0.60Bb	13.84±1.29Aa	6.53±0.52Abc	6.18±0.97Aab	6.31±0.69Abc	6.73±1.01Aab
2019年	0~10	8.60±1.55Ab	7.63±1.37Bd	8.18±1.67Ab	6.41±1.37Bb	9.20±1.71Aa	6.88±1.20Bc
	10~20	10.36±1.49Aa	10.27±1.17Ac	9.82±1.45Aa	9.12±1.30Aa	10.15±1.35Aa	9.79±1.33Aa
	20~40	6.39±1.13Bc	14.21±1.81Ab	7.17±1.01Bb	8.77±0.93Aa	7.30±1.43Bb	8.92±1.27Aab
	40~60	4.34±0.85Bd	15.61±2.64Ab	5.87±1.19Bc	7.50±1.55Aab	6.07±1.43Bb	7.81±1.47Abc
	60~80	5.50±0.54Bcd	19.05±2.12Aa	6.71±1.24Bbc	8.06±2.11Aab	6.42±0.66Ab	7.43±1.49Abc
	80~100	8.80±0.64Bb	19.29±1.66Aa	6.96±1.17Bbc	8.81±2.25Aa	7.04±0.42Bb	9.11±1.31Aab

注:同列不同小写字母表示不同土层深度之间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示斑块内外之间差异显著($P<0.05$)。

表3 不同大小斑块内部灰钙土与外部风沙土0～100 cm土层平均含水量(平均值±标准差)

Tab. 3 The average water content of 0−100 cm soil layer in different size patches of sierozem inside and aeolian soil outside(mean ± SD)

年份	土层深度/cm	内部灰钙土			外部风沙土		
		大斑块	中斑块	小斑块	大斑块	中斑块	小斑块
2017年	0~100	7.13±0.93A	7.52±0.74A	7.36±0.86A	11.95±1.12A	8.65±1.00B	9.36±1.02B
2018年	0~100	5.46±0.63A	6.09±0.71A	6.03±0.57A	10.49±1.38A	5.62±1.01B	5.89±1.06B
2019年	0~100	6.90±0.75A	7.14±1.11A	7.30±0.95A	15.42±1.62A	8.18±1.20B	8.32±1.05B

注:同行不同大写字母表示不同斑块大小之间差异显著(P<0.05)。

从图3可以看出,无论是灰钙土还是风沙土,土壤含水量的变异系数随土层深度的增加而减小,表明土层越深土壤含水量越稳定;同一降雨年型下灰钙土和风沙土各斑块的含水量变异系数变化趋势相似,表明降雨年型对含水量变异影响最大;同一降雨年型的同一土层中,风沙土含水量变异系数大于灰钙土;对比不同年份得出,2017年土壤浅层和深层的变异系数差别最大,其次为2019年,2018年最小。

2.4 土壤储水特征与降雨量相关性分析

由图4可以看出,2017年5—7月中旬土壤储水量逐渐降低,7月中旬后土壤储水量有所回升,在9月达到最高点,其后土壤储水量有所下降,从全年来看,大、中、小斑块内部灰钙土生长季末与生长季初土壤储水变化量分别为11.71 mm、10.60 mm、17.30 mm,表现为积累型,外部风沙土分别为1.11 mm、1.51 mm、0.01 mm,表现为积累型;2018年由于夏秋严重干旱,土壤储水量在5月下降后一直处于较低的状态且几乎无波动,大、中、小斑块内部灰钙土土壤储水变化量分别为−21.55 mm、−47.02 mm、−17.93 mm,外部风沙土分别为−28.89 mm、−30.26 mm、−25.77 mm,2种土壤均表现为消耗型;2019年土壤储水量在7月和8月中旬有2次波峰,8月中旬以后土壤储水量持续下降,大、中、小斑块内部灰钙土土壤储水变化量分别为14.12 mm、11.13 mm、19.72 mm,外部风沙土分别为−14.83 mm、28.34 mm、13.33 mm,2种土壤大多表现为积累型。

研究区3 a生长季内灰钙土与风沙土的土壤储水量波动趋势基本一致,但灰钙土的土壤储水量整体低于风沙土,且灰钙土土壤储水量的变化幅度(27.88~107.84 mm)小于风沙土(45.71~185.69 mm)。大、中、小斑块内部灰钙土的土壤储水量相差

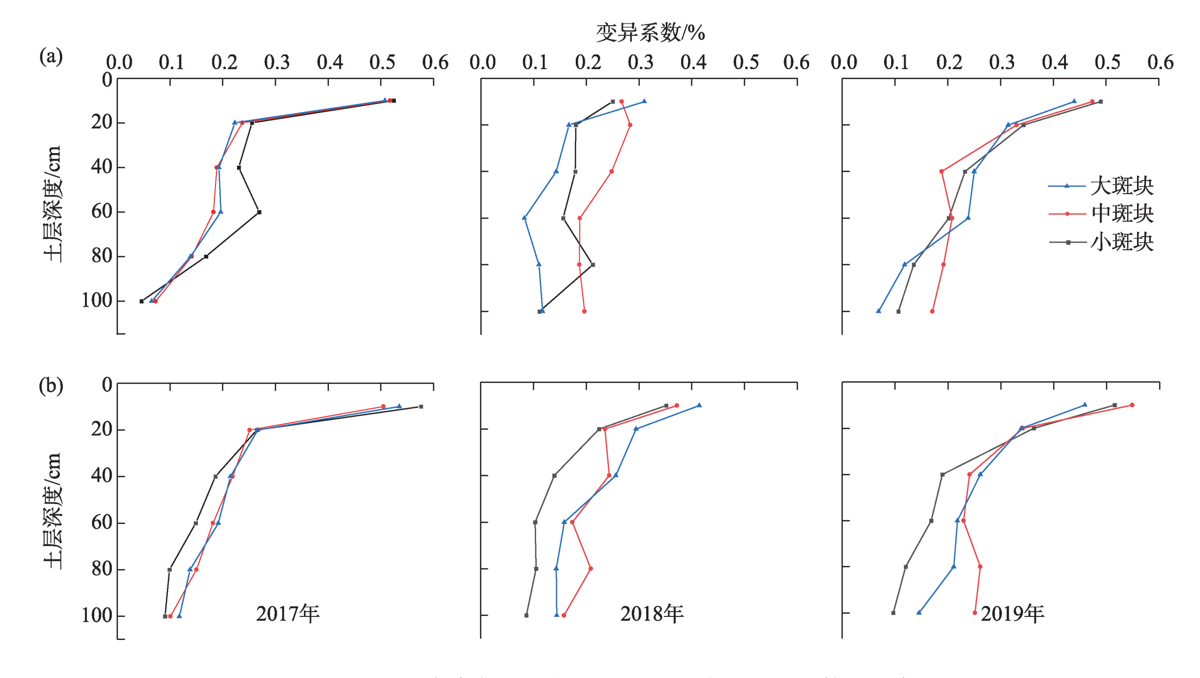


图3 2017—2019年灰钙土(a)与风沙土(b)含水量变异系数的垂直变化

Fig. 3 Vertical variation in the coefficient of variation for soil water content of sierozem (a) and aeolian soil (b) from 2017 to 2019

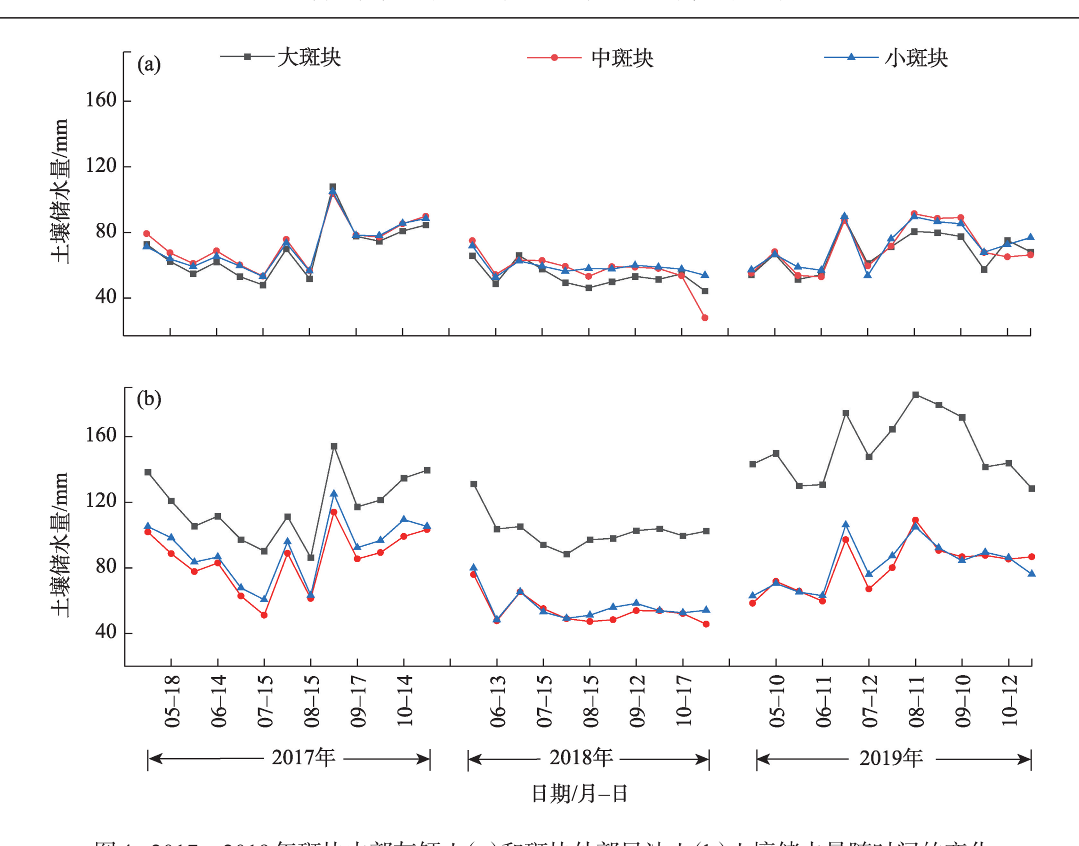


图4 2017—2019年斑块内部灰钙土(a)和斑块外部风沙土(b)土壤储水量随时间的变化

Fig. 4 Variation of soil water storage with time in sierozem (a) and aeolian soil (b) from 2017 to 2019

不大,表明灰钙土受降雨格局的影响较小;大斑块外围风沙土的土壤储水量远高于中斑块和小斑块,表明风沙土受降雨格局的影响较大。

对土壤储水变化量与累积降雨量的关系进行拟合分析(图5),发现当降雨量<16 mm时,2种土壤的土壤储水量均为负值,说明土壤水分处于消耗状态,且在相同降雨条件下,风沙土的消耗量大于灰钙土;当降雨量>16 mm时,2种土壤的土壤储水量为正值,说明此时土壤水分处于积累状态。当降雨量在16~25 mm左右时,灰钙土的积累量大于风沙土,当降雨量>25 mm左右时,灰钙土的积累量小于风沙土。风沙土拟合直线的斜率大于灰钙土,再一次证明了风沙土受降雨的影响大于灰钙土。

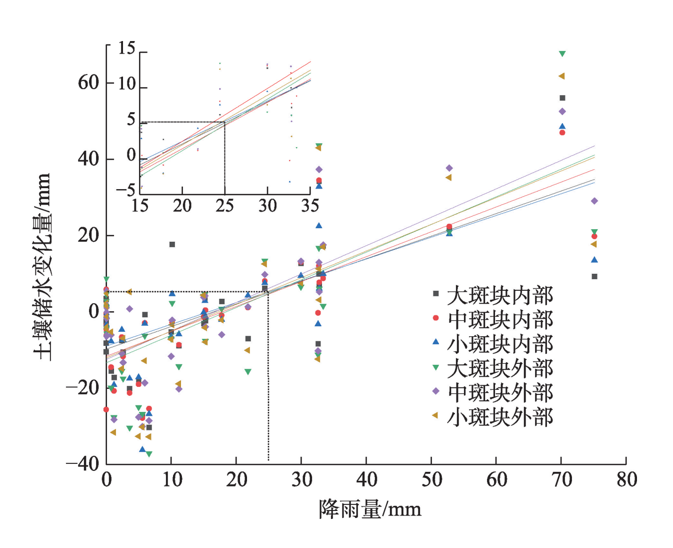


图5 土壤储水变化量与降雨量的拟合关系

Fig. 5 The fitting relation between soil water storage variation and rainfall

3 讨 论

3.1 不同土壤类型土壤水分时空变化特征

研究表明,在干旱半干旱荒漠地区降雨是土壤水分变化的主要控制因素,土壤水分随降雨呈现出明显的季节性变化特征[18, 35]。通过连续3 a对宁夏荒漠草原的土壤水分进行动态监测与分析,发现灰钙土和风沙土的土壤水分也随降雨呈现出明显的季节性变化特征,2017年和2019年土壤水分年内变化大致表现为:春季缺墒(5月)、夏秋季增失墒交替(6—10月),与陈洪松等[36]研究的黄土高原地区荒草地与裸地土壤水分特征一致;2018年春季增墒(5月)、夏秋季稳墒(6—10月),与张敏等[37]研究的黄土丘陵地区不同土壤水分的变化特征不一致,这是由于2018年降雨主要集中在春季,夏秋两季严重干

旱导致的。在年内各月份降雨量较多的2017年和2019年,土壤水分在降雨结束后的一定时间内达到峰值,同时又会受蒸发作用等因素而不断被消耗,土壤水分随不同等级的降雨呈现出月际间干湿交替的变化规律,与陈晓莹等[38]研究结果一致。2017年7月太阳辐射强,土壤水分蒸发加剧,土壤含水量在该月份最低,10月气温逐渐降低,植物蒸腾减少,水分蒸发强度减小,导致该月份土壤含水量最高;2018年5月降雨多,土壤含水量最高,夏秋严重干旱导致土壤水分波动小,水分连续性强;2019年8月气温高、水分蒸发强烈,但降雨量大,故土壤含水量高,而5月降雨少且土壤水分蒸发增加,导致土壤含水量最低。

在宁夏荒漠草原地区,灰钙土在风蚀作用下逐渐沙化为风沙土,土壤物理性质的改变会影响土壤水分的空间分布[39]。其中,灰钙土结构紧实,黏粉粒、$CaCO_3$含量高,非毛管孔隙度低[23],使得水分入渗深度浅,土壤水分主要分布在10~40 cm,在大降雨事件下水分最大入渗深度可达60 cm,适合于耐旱的浅根系植物生长;风沙土结构松散,砂粒含量高,土粒间孔隙大[23],渗透性较高,使得水分更易入渗,土壤深层更易得到水分补充,土壤水分主要分布在20~100 cm,最大水分入渗深度超过100 cm,适合于深根系、耗水量较大的灌木生长。此外,由于土壤表层与外界大气交换过程强烈,受气候的影响较大,在降雨后表层土壤含水量迅速增加,同时由于蒸发强烈,土壤水分又迅速降低,所以2种土壤在0~20 cm表层土壤水分波动大,但随着深度增加土壤水分波动减小。对于不同大小斑块而言,面积越大的斑块越有利于土壤水分聚集,土壤水分越高,但在宁夏荒漠草原地区降雨大部分以单次的小降雨事件为主,所以聚集效应不是很明显,导致大、中、小斑块内部灰钙土之间水分差异不显著;但当降水量较大时,大斑块入渗较慢,形成径流对外部风沙土的水分补给明显,因而大斑块外部风沙土水分显著高于中、小斑块,所以在预防灰钙土沙化时也需要重点注意大斑块外围风沙土的土壤水分高的特性而针对性采取固沙保墒措施,如可通过压砂等[40]方法减少土壤表层的水分蒸发。

3.2 不同土壤类型土壤储水量与降雨量关系

沈菊等[41]研究表明,降雨过程中气温越高,植物蒸腾和地表蒸发的水分越多,气温与土壤含水量呈负相关关系。研究区在夏秋季的高温作用下土壤水分蒸发明显,因此,需要在夏秋季有足够的降雨才能对土壤水分进行有效补充。对于2017年和2019年而言,降雨主要发生在夏秋季,夏秋季降雨量占比分别为全年降雨量的92.4%,年内土壤储水量大多表现为积累型;但对于2018年而言,降雨主要集中在春季,春季降雨量占比为全年降雨量的76.2%,年内土壤储水量表现为消耗型。因此,研究区在夏秋季连续大降雨下有利于全年储水量的补给,在经过冬季冻结以及春季冻融后,可作为来年生长季初土壤水分的基础。

研究表明,降雨是影响干旱地区土壤水分消涨的关键因素[42-43]。王涛[44]在黄土高原旱地雨养农业生产中,发现降水是对土壤蓄水量影响最大的因素,其对土壤蓄水量的贡献度在70%左右。通过对土壤储水变化量与降雨量的拟合关系分析发现,灰钙土拟合直线斜率大于风沙土,表明风沙土土壤储水量受降雨影响更大,在有效降雨时可获得更多的水分储存,但同时也更易在干旱少雨时丢失储存的土壤水分,此结论印证了风沙土变异程度更大这一结果,这是由于风沙土相对于灰钙土具有更大的孔隙度,水分渗透率相对较高[45]。由于土壤水分会受到土壤蒸发、径流损失、水分渗漏、植物吸收和蒸腾等因素而消耗,因此,研究区内降雨量需达到16 mm以上,土壤储水量才会有所增加。类似的,常昌明等[46]通过分析内蒙古苏尼特荒漠草原土壤水分对降雨的响应发现,Ⅰ~Ⅱ级小降雨事件对土壤水分的补给作用十分微弱,而Ⅳ~Ⅴ级大降雨对土壤水分补给效果显著。随着研究区降雨量的不断累积,斑块内外的土壤储水量均会不同程度的增加,其中,对于I~IV降雨条件下,灰钙土能获得更大的土壤储水量,这是由于灰钙土的保墒能力更强,能够将降水有效储存起来。而当降雨量增至Ⅴ级时,孔隙度大的风沙土则能通过水分的快速入渗,将水分储存在深层土壤中。土壤性质的不同,会使得该地区对降雨的水分存储能力产生差异。对于土壤结构致密的灰钙土,其透水性能差,在减少土壤水分蒸发的同时也阻碍了降水的入渗,入渗效果弱于风沙土。对于土壤结构松散的风沙土,其透水性能好,在增强土壤水分入渗的同时也加快了降水的蒸发,保墒效果弱于灰钙土。因此,对于连续降雨或大降雨,风沙土更利于土壤水分的存储;而对于间歇性降雨

或小降雨,灰钙土更利于土壤水分的存储,但降雨间歇时间过长或雨量过少,则可能出现一定时间内的水分蒸发量大于入渗量,导致土壤储水量较降雨前下降的情况[32]。

4 结 论

(1)土壤年平均含水量为:2017年>2019年>2018年,2017年秋季土壤含水量大于春夏两季,在10月最高,7月最低;2018年春季土壤含水量大于夏秋两季,在5月最高;2019年夏季土壤含水量大于春秋两季,在8月最高,5月最低。降雨分配是决定土壤年平均含水量的关键因子,全年降雨量最多的2018年,土壤年平均含水量反而最低。土壤含水量的季节变化取决于当季降雨量、气温和蒸发蒸腾的综合作用。

(2)灰钙土含水量主要集中于10~40 cm土层,而风沙土含水量主要集中于20~100 cm土层。在0~20 cm土层,灰钙土含水量大于风沙土;20~80 cm土层,风沙土含水量大于灰钙土。且2种土壤类型的土壤含水量在表层波动剧烈,深层波动趋于平缓。

(3)土壤储水变化量与降雨量呈一次线性关系,且风沙土储水量受降雨影响大于灰钙土。当降雨量>16 mm时,2种土壤类型水分开始积累;16~25 mm时,灰钙土储水量高于风沙土;>25 mm时,风沙土储水量高于灰钙土。

参考文献(References):

[1] 冯伟, 李卫, 杨文斌, 等. 毛乌素沙地樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 101-107. [Feng Wei, Li Wei, Yang Wenbin, et al. Dynamic response of soil moisture to rainfall in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest of Mu Us Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 101-107.]

[2] 聂明鹤, 沈艳, 陆颖, 等. 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片-土壤生态化学计量特征[J]. 草地学报, 2021, 29(1): 131-140. [Nie Minghe, Shen Yan, Lu Ying, et al. Ecostoichiometric characteristics of dominant plant leaves-soil ecology in different communities of desert steppe in Yanchi County, Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(1): 131-140.]

[3] 吴婷, 宋乃平, 陈晓莹, 等. 围栏封育和放牧对盐池荒漠草原植物群落特征的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 651-660. [Wu Ting, Song Naiping, Chen Xiaoying, et al. Effects of enclosure and grazing on the characteristics of plant communities in desert steppe of Yanchi[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(3): 651-660.]

[4] 秦洁, 司建华, 贾冰, 等. 巴丹吉林沙漠植被群落特征与土壤水分关系研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 207-222. [Qin Jie, Si Jianhua, Jia Bing, et al. Study on the relationship between vegetation community characteristics and soil moisture in Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 207-222.]

[5] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 198-206. [Chen Juan, Song Naiping, Chen Lin, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in different cover types of desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 198-206.]

[6] 罗叙, 李建平, 张翼, 等. 荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 142-150, 158. [Luo Xu, Li Jianping, Zhang Yi, et al. Response of spatial and temporal variation of soil moisture to precipitation change in desert steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 142-150, 158.]

[7] Du Lingtong, Zeng Yijian, Ma Longlong, et al. Effects of anthropogenic revegetation on the water and carbon cycles of a desert steppe ecosystem[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 300: 108339.

[8] 刘佳欣, 刘嘉丽, 王妮, 等. 盐池荒漠草原人工种植四种灌木的适应性分析[J]. 农业科学研究, 2022, 43(3): 1-5. [Liu Jiaxin, Liu Jiali, Wang Ni, et al. Adaptability analysis of four artificial planting shrubs in Yanchi desert steppe[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2022, 43(3): 1-5.]

[9] 王乐, 杜灵通, 马龙龙, 等. 人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 246-254. [Wang Le, Du Lingtong, Ma Longlong, et al. Effects of planted shrub encroachment on carbon storage of desert steppe ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 246-254.]

[10] Yang J, Chen H, Nie Y, et al. Dynamic variations in profile soil water on karst hillslopes in Southwest China[J]. Catena, 2019, 172: 655-663.

[11] Rotzer K, Montzka C, Bogena H, et al. Catchment scale validation of SMOS and ASCAT soil moisture products using hydrological modeling and temporal stability analysis[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 934-946.

[12] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东沙地不同植被恢复措施下土壤水分变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 76-86. [Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Variation of soil moisture content in vegetation restoration area of sandy land at east shore of Qinghai Lake[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 76-86.]

[13] Wang X B, Zhou B Y, Sun X F, et al. Soil tillage management affects maize grain yield by regulating spatial distribution coordination of roots, soil moisture and nitrogen status[J]. Plos One, 2015, 10(6): e0129231.

[14] 李亚新, 陈伟, 孙从建, 等. 黄土丘陵区农耕地与撂荒地土壤水分特征及对降雨的响应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 114-120. [Li Yaxin, Chen Wei, Sun Congjian, et al. Soil moisture characteristics and their response to rainfall in cultivated land and abandoned land in loess hilly region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 114-120.]

[15] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720. [Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 715-720.]

[16] 袁立敏, 杨制国, 薛博, 等. 呼伦贝尔草原风蚀坑土壤水分异质效应研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1598-1606. [Yuan Limin, Yang Zhiguo, Xue Bo, et al. Heterogeneity of soil moisture of blowouts in HulunBuir grassland[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1598-1606.]

[17] 王佳, 田青, 王理德, 等. 民勤青土湖区不同年限退耕地对土壤水分与物种多样性的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 605-614. [Wang Jia, Tian Qing, Wang Lide, et al. Effects of different years of returning farmland on soil moisture and species diversity in Minqin Qingtu Lake area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 605-614.]

[18] 李新乐, 吴波, 张建平, 等. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5701-5708. [Li Xinle, Wu Bo, Zhang Jianping, et al. Dynamics of shallow soil water content in *Nitraria tangutorum* nebkha and response to rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5701-5708.]

[19] Fay P A, Blair J M, Smith M D, et al. Relative effects of precipitation variability and warming on tallgrass prairie ecosystem function[J]. Biogeosciences, 2011, 8(10): 3053-3068.

[20] 魏永霞, 王鹤, 刘慧, 等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 290-299. [Wei Yongxia, Wang He, Liu Hui, et al. Effect of biochar on soil moisture and its infiltration performance in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 290-299.]

[21] 郑飞龙, 王西娜, 葛敏, 等. 压砂条件下灰钙土地区农田土壤水分垂直入渗特征研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 314-321. [Zheng Feilong, Wang Xina, Ge Min, et al. Characteristics of vertical water infiltration in a sierozem soil under gravel-sand mulching condition[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(2): 314-321.]

[22] 汪璇, 杜树汉, 邓利梅, 等. 土壤不同孔隙度对川西典型植被系统水源涵养的影响[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(1): 19-28. [Wang Xuan, Du Shuhan, Deng Limei, et al. Effects of different soil porosity on the water conservation of typical vegetation system in western Sichuan[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(1): 19-28.]

[23] 陈娟, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 18-23. [Chen Juan, Chen Lin, Song Naiping, et al. Soil infiltration characteristics of different soils types in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 18-23.]

[24] 苏莹, 陈林, 李月飞, 等. 荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1308-1316. [Su Ying, Chen Lin, Li Yuefei, et al. Spatiotemporal variation of moisture content of different soil types in desert steppe[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1308-1316.]

[25] 吴世磊, 刘怀谷, 陈德朝, 等. 川西北高寒沙地不同恢复年限对土壤水分变化的影响[J]. 四川林业科技, 2022, 43(6): 57-62. [Wu Shilei, Liu Huaigu, Chen Dechao, et al.Effects of different restoration years on soil moisture in alpine sandy land of Northwest Sichuan[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2022, 43(6): 57-62.]

[26] 牛存洋, 阿拉木萨, 刘亚, 等. 科尔沁沙地固沙植物根系与土壤水分特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 106-111. [Niu Cunyang, Alasamu, Liu Ya, et al. The characteristics of sand-fixation plantations roots and soil moisture in Horqin sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(10): 106-111.]

[27] Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, et al. Fractal approach to estimating changes in soil properties following the establishment of *Caragana korshinskii* shelterbelts in Ningxia, NW China[J]. Ecological Indicators, 2014, 43: 236-243.

[28] 薛毅, 王兴, 宋乃平, 等. 荒漠草原不同大小"土岛"生境中短花针茅种群小尺度点格局分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(2): 211-220. [Xue Yi, Wang Xing, Song Naiping, et al. Fine-scale spatial point patterns of *Stipa breviflora* population at different "Soil Island" habitat sizes in desert steppe[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2019, 45(2): 211-220.]

[29] 宋乃平, 王兴, 陈林, 等. 荒漠草原"土岛"生境群落物种共存机制[J]. 生物多样性, 2018, 26(7): 667-677. [Song Naiping, Wang Xing, Chen Lin, et al. Co-existence mechanims of plant species within "soil islands" habitat of desert steppe[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(7): 667-677.]

[30] 宋乃平, 吴旭东, 潘军, 等. 荒漠草原人工柠条林对土壤质地演进过程的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(6): 703-711. [Song Naiping, Wu Xudong, Pan Jun, et al. Impacts of artificial *Caragana* intermediastand on soil texture evolution in desert steppe[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2015, 41(6): 703-711.]

[31] 陈晓莹, 荒漠草原两种典型土壤的水分特征及其影响因素[D]. 银川: 宁夏大学, 2020. [Chen Xiaoying, Water Characteristics of Two Typical Soil Types in Desert Steppe and Their Influencing Factors[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.]

[32] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355. [Wei Yafen,

Guo Ke, Chen Jiquan. Effect of precipitation pattern on recruitment of soil water in Kubuqi desert, northwestern China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1346-1355.]

[33] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake hill, texas [J]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 259-281.

[34] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(4): 457-466. [Yang Lei, Zhang Handan, Chen Liding. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48 (4): 457-466.]

[35] 朱海, 胡顺军, 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 117-126. [Zhu Hai, Hu Shunjun, Chen Yongbao. Spatio-temporal variation of soil moisture in fixed dunes at the southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 117-126.]

[36] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报, 2005,16(10): 1853-1857. [Chen Hongsong, Shao Ming'an, Wang Kelin. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1853-1857.]

[37] 张敏, 刘爽, 刘勇, 等. 黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 115-120, 128. [Zhang Min, Liu Shuang, Liu Yong, et al. Soil moisture variation characteristics of different land use types in the moderate slope sandy area of Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 115-120, 128.]

[38] 陈晓莹, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原两种类型土壤的水分动态对比[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1560-1570. [Chen Xiaoying, Chen Lin, Song Naiping, et al. Comparison on moisture dynamics of two different soil types in desert steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1560-1570.]

[39] 余轩, 王兴, 吴婷, 等. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8516-8524. [Yu Xuan, Wang Xing, Wu Ting, et al. Relationship between restoration of plant diversity and soil habitat in desert steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8516-8524.]

[40] Xie Z K, Wang Y J, Cheng G D, et al. Particle-size effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency and watermelon yield in fields mulched with gravel and sand in semi-arid Loess Plateau of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(6): 917-923.

[41] 沈菊, 辛萍萍, 杨起楠, 等. 柴达木盆地东部浅层土壤水分增量对降水的响应[J]. 中国农学通报, 2022, 38(35): 54-61. [Shen Ju, Xin Pingping, Yang Qinan, et al. Response of shallow soil moisture increment to precipitation in eastern Qaidam Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(35): 54-61.]

[42] 杨启红, 陈丽华, 张富, 等. 土壤水分变异对降雨和植被的响应[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 88-94. [Yang Qihong, Chen Lihua, Zhang Fu, et al. Responses of soil moisture variations to rainfall and vegetation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(S2): 88-94.]

[43] 石建周, 刘贤德, 田青, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林坡面土壤含水量的降雨响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 594-604. [Shi Jianzhou, Liu Xiande, Tian Qing, et al. Rainfall response of soil water content on a slope of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the semi-arid Liupan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 594-604.]

[44] 王涛. 旱地冬小麦不同覆盖方式夏闲期土壤蓄水与降水量和地温的关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. [Wang Tao. Study on the Relationship between Soil Water Storage with Precipitation and Soil Temperature during the Summer Fallow Period of Dryland Winter Wheat under Different Mulching Methods[D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2022.]

[45] 段民福, 廖超英, 孙长忠, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林土壤物理性质的时空变异规律[J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 188-192. [Duan Minfu, Liao Chaoying, Sun Changzhong, et al. Spatio-temporal variabilities of soil physical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* artificial forest in Mu Us Desert[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(3): 188-192.]

[46] 常昌明, 牛建明, 王海, 等. 小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 260-265. [Chang Changming, Niu Jianming, Wang Hai, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall in a *Stipa klemenzii* steppe [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 260-265.]

Spatiotemporal characteristics of sierozem and aeolian soil moisture levels in a desert steppe

YANG Shuangqi[1,2,3], SONG Naiping[1,2,3], WANG Xing[1,2,3],
CHEN Xiaoying[4], CHANG Daoqin[1,2,3]

(1. College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. School of Agricultural, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Due to the interference from human activities and natural factors, the primary sierozem area in the Ningxia desert steppe has gradually shrunk due to long-term desertification and formed island patches within the surrounding aeolian soil. To reveal the spatiotemporal characteristics of soil moisture after sierozem desertification, a comparative study was carried out between the large (200−300 m^2), medium (approximately 100 m^2), and small (approximately 50 m^2) sierozem patches and the surrounding aeolian soil in Wanjigou Village, Yanchi County, Ningxia, during the growing season (May to October from 2017 to 2019). The uniform rainfall pattern in 2017 led to the highest annual average soil moisture content. While the annual rainfall in 2018 was slightly higher than that in 2017, it was concentrated in the spring, and there were almost no rainfall events in the summer and autumn, resulting in a low soil moisture content throughout the year. The summer rainfall pattern in 2019 resulted in the highest average soil moisture content during the summer period. The soil moisture content of sierozem in the 0−100 cm soil layer first showed an increase and then a decrease with increases in soil depth and was greatest in the 10−40 cm soil layer. The soil moisture content of the aeolian soil increased with soil depth, and the soil moisture content of the 0−20 cm soil layer was much lower than that of the 20−100 cm layer. The moisture content of sierozem in the 0−20 cm soil layer was greater than that of the aeolian soil, while the moisture content of the sierozem in the 20−100 cm soil layer was significantly lower than that of the aeolian soil (except for small and medium-sized patches in 2018). There was no significant difference ($P > 0.05$) in the soil moisture content of the sierozem between the different patch sizes, except that the soil moisture content of the aeolian soil surrounding the large-sized patches was significantly greater than that of the small and medium-sized patches ($P < 0.05$). The water storage of sierozem in the 0−100 cm soil layer was generally lower than that of the aeolian soil, and the variation range was smaller than that of the aeolian soil during the same period. When the rainfall was <16 mm, the water in both soil types was in a consumption state. When the rainfall ranged from 16 to 25 mm, the water storage capacity of the sierozem was greater than that of the aeolian soil, but when the rainfall was >25 mm, the water storage capacity of the aeolian soil was greater than that of the sierozem. The soil moisture content in the desert steppe was dominated by the rainfall, its distribution pattern, and soil type. The moisture contents of the sierozem and aeolian soils differ in their profiles, as well as in response to rainfall.

Keywords: desert steppe; soil moisture; soil type; precipitation changes; soil water storage